

УДК 537.521.1

О КОНТРАГИРОВАНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В. И. ШИШКОВСКИЙ, А. А. СОЛОВЬЕВ, В. Н. СЕРГЕЕВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Рассматриваются вопросы контрагирования высокочастотного разряда низкого давления. Приведены результаты экспериментов в воздушной плазме. Показано, что в зависимости от давления и тока разряда высокочастотный разряд имеет различный механизм контракции.

Таблиц 1, библиографий 7.

Известен ряд экспериментальных и теоретических исследований [1 ÷ 6], устанавливающих, что положительный столб тлеющего разряда при $P > 1$ мм рт. ст. и определенных токовых режимах может контрагироваться, т. е. образуется резко ограниченный светящийся шнур, проходящий по оси разрядной камеры.

Представляет интерес исследование радиального распределения заряженных частиц в высокочастотных (в. ч.) разрядах. Распределение этих частиц по радиусу цилиндрической разрядной камеры можно получить из решения уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_a r \frac{\partial n}{\partial r} \right] + I - R = 0,$$

где n — концентрация заряженных частиц, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, I — скорость ионизации, R — скорость рекомбинации и прилипания электронов.

Определение I и R для в. ч. воздушной плазмы в настоящее время весьма затруднительно, а радиальное распределение параметров плазмы дает ответ на ряд вопросов, интересных как в научном, так и в прикладном плане. Нами проведены экспериментальные исследования радиального распределения электронной концентрации — n_e , эффективной электронной температуры — T_e и напряженности электрического поля — E .

Измерения по двухзондовой методике проводились в кварцевой разрядной камере при различных давлениях и токах разряда. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Нами установлено, что при давлении $P = 0,1$ мм рт. ст. экспериментальные значения хорошо совпадают с рассчитанными по теории Шоттки [7], что еще раз говорит о подобии в. ч. разряда низкого давления положительному столбу тлеющего разряда. При давлении $P \gg 1$ мм рт. ст. в. ч. разряд контрагирован.

Мы пока не имеем теории контрагирования в. ч. разряда, поэтому проведем оценку механизма контракции на основании тех моделей,

Радиальное распределение концентрации электронов

	№ п.п.	$x = \frac{r}{R_0}$	$I_p = 170 \text{ ма}$			$I_p = 190 \text{ ма}$			$I_p = 210 \text{ ма}$		
			$\frac{n_r}{n_0}$	T_e	E	$\frac{n_r}{n_0}$	T_e	E	$\frac{n_r}{n_0}$	T_e	E
				эВ	$\frac{\delta_{\text{эф}}}{\text{см}}$		эВ	$\frac{\delta_{\text{эф}}}{\text{см}}$		эВ	$\frac{\delta_{\text{эф}}}{\text{см}}$
$P = 1 \text{ мм рт. ст.}$	1	0	$1,00 \pm 0,08$	$10,3 \pm 0,8$	22 ± 2	$1,00 \pm 0,08$	$9,9 \pm 0,7$	20 ± 2	$1,00 \pm 0,08$	$9,5 \pm 0,7$	19 ± 2
	2	0,12	$0,76 \pm 0,07$	$10,1 \pm 0,8$	24 ± 2	$0,81 \pm 0,07$	$9,7 \pm 0,7$	22 ± 2	$0,94 \pm 0,08$	$9,4 \pm 0,7$	21 ± 2
	3	0,24	$0,45 \pm 0,04$	$10,2 \pm 0,8$	21 ± 2	$0,5 \pm 0,05$	$10,1 \pm 0,8$	21 ± 2	$0,60 \pm 0,06$	$10,1 \pm 0,8$	20 ± 2
	4	0,36	$0,26 \pm 0,03$	$11,2 \pm 0,8$	23 ± 2	$0,37 \pm 0,04$	$10,0 \pm 0,8$	20 ± 2	$0,40 \pm 0,04$	$9,4 \pm 0,7$	19 ± 2
	5	0,48	$0,24 \pm 0,02$	$10,1 \pm 0,8$	20 ± 2	$0,26 \pm 0,02$	$10,0 \pm 0,8$	20 ± 2	$0,32 \pm 0,03$	$9,7 \pm 0,7$	20 ± 2
	6	0,64	$0,20 \pm 0,02$	$9,7 \pm 0,8$	21 ± 2	$0,20 \pm 0,02$	$9,6 \pm 0,7$	21 ± 2	$0,22 \pm 0,02$	$9,7 \pm 0,7$	19 ± 2
	7	0,80	$0,23 \pm 0,02$	$10,0 \pm 0,8$	23 ± 2	$0,30 \pm 0,04$	$9,7 \pm 0,7$	19 ± 2	$0,32 \pm 0,03$	$9,8 \pm 0,8$	19 ± 2
$P = 3 \text{ мм рт. ст.}$	1	0	$1,00 \pm 0,08$	$11,0 \pm 0,8$	24 ± 2	$1,00 \pm 0,08$	$10,3 \pm 0,8$	24 ± 2	$1,00 \pm 0,08$	$9,7 \pm 0,7$	23 ± 2
	2	0,12	$0,94 \pm 0,08$	$10,7 \pm 0,8$	25 ± 2	$0,73 \pm 0,07$	$10,3 \pm 0,8$	20 ± 2	$0,68 \pm 0,07$	$9,5 \pm 0,7$	18 ± 2
	3	0,24	$0,64 \pm 0,07$	$10,2 \pm 0,8$	24 ± 2	$0,50 \pm 0,05$	$10,0 \pm 0,8$	21 ± 2	$0,45 \pm 0,04$	$9,9 \pm 0,7$	18 ± 2
	4	0,36	$0,38 \pm 0,04$	$10,0 \pm 0,8$	24 ± 2	$0,41 \pm 0,04$	$9,8 \pm 0,7$	21 ± 2	$0,42 \pm 0,04$	$9,0 \pm 9,7$	18 ± 2
	5	0,48	$0,20 \pm 0,02$	$9,6 \pm 0,7$	24 ± 2	$0,22 \pm 0,02$	$9,3 \pm 0,7$	20 ± 2	$0,23 \pm 0,02$	$9,4 \pm 0,7$	18 ± 2
	6	0,64	$0,13 \pm 0,01$	$10,0 \pm 0,8$	22 ± 2	$0,13 \pm 0,01$	$9,8 \pm 0,7$	21 ± 2	$0,12 \pm 0,03$	$9,5 \pm 0,7$	18 ± 2
	7	0,80	$0,21 \pm 0,02$	$9,7 \pm 0,7$	17 ± 2	$0,21 \pm 0,02$	$9,7 \pm 0,7$	19 ± 2	$0,22 \pm 0,02$	$9,6 \pm 0,7$	18 ± 2

которые известны в настоящее время для положительного столба [4 ÷ 6].

Как видно из табл. 1, при $P = 1$ мм рт. ст. с увеличением разрядного тока контрагирование увеличивается. При $P = 1$ мм рт. ст. имеем чисто диффузионный режим, т. е. T_e и E постоянны, с точностью до ошибки эксперимента, по всему сечению разрядной камеры $n_{e(r)}$ меняется в силу того, что электроны гибнут только на стенках, рекомбинацией в объеме можно пренебречь. За счет диффузии электронов на стенку, очевидно, меняется форма функции распределения электронов по энергиям в зависимости от расстояния до оси. По мере удаления от оси уменьшается число быстрых электронов в распределении и, следовательно, значительно падает число ионизаций и возбуждений. Визуально разряд представляется как светящийся шнур, расположенный по оси разрядной камеры. При таком механизме контракции увеличению разрядного тока и связанному с ним уменьшению T_e на оси должно соответствовать увеличение контрагирования, что и наблюдается в эксперименте.

При переходе к более высоким давлениям, например $P \geq 3$ мм рт. ст. нами наблюдалось изменение механизма контракции, что подтвердило ранее высказанное предположение [6]. Начинает играть существенную роль неоднородность распределений газовой температуры по радиусу. При прохождении разрядного тока разогрев газа происходит неравномерно: температура газа у стенок ниже, чем на оси, а соответственно, плотность выше, поэтому T_e у стенок будет несколько ниже чем на оси. Это приводит к тому, что ионизация на оси будет происходить более интенсивно и n_e будет выше, чем в периферийных частях разрядной камеры. Это в свою очередь вызовет дальнейшее уменьшение плотности нейтрального газа, т. е. развивается лавинообразный процесс, в результате чего образуется токопроводящий шнур, эффективный диаметр которого меньше диаметра разрядной трубки. При этом рекомбинация в объеме также не играет заметной роли. Измерения T_e показали, что значение T_e в центре несколько выше всех остальных. За счет электронной теплопроводности градиент T_e уменьшается и шнур увеличивается в диаметре, что и видно из табл. 1. Отсюда же и следует, что при неизменяющемся разрядном токе с увеличением давления контракция увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Вагнер, А. И. Зудов, А. Д. Хахаев. ЖТФ, 31, 336 (1951).
2. В. Ю. Баранов, Ю. Н. Ульянов. ЖТФ, 39, 249 (1965).
3. Ю. М. Каган, Р. И. Лягущенко. «Оптика и спектроскопия», 15, 13 (1963).
4. А. Т. Рахимов, Ф. Р. Улинич. ДАН СССР, 187, 72 (1969).
5. В. Ю. Баранов, К. Н. Ульянов. ЖТФ, 39, 259 (1969).
6. Ю. Г. Козлов. «Оптика и спектроскопия», 38, 654 (1970).
7. Schottky, I. Issendorf. «Phys. Zs.», 25, 342, 635 (1924).